

## 4.1 Secado y molienda preliminar

ALBERTO VIRELLA BLODA

Químico. Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos

### índice

1. Las operaciones de secado y molienda.
2. Generalidades sobre el secado.
3. Secado autónomo.
  - 3.1. Secadores rotativos simples.
  - 3.2. Secadores rotativos dobles.
  - 3.3. Secadores rotativos triples.
  - 3.4. Secadores estáticos con agitadores de eje horizontal.
  - 3.5. Secadores estáticos con agitadores de eje vertical.
- 3.6. Secado en separadores centrífugos.
- 3.7. Secado en corriente ascendente de gases calientes.
4. Secado combinado con la molienda preliminar.
  - 4.1. Secado combinado con molinos de impacto.
  - 4.2. Secado combinado con molienda autógena.
  - 4.3. Secado en molinos de rodillos.
  - 4.4. Secado y molienda en lecho fluidificado.
5. Montaje y funcionamiento de las instalaciones de secado.
  - 5.1. Accionamiento.
  - 5.2. Calentamiento.
  - 5.3. Alimentación.
  - 5.4. Descarga.
  - 5.5. Despolvoreamiento.



### resumen

*La ponencia trata de ofrecer una visión de conjunto, actualizada, de los problemas de secado y molienda preliminar en la industria del cemento, especialmente en la preparación de crudos por vía seca. Establece distinción entre el secado autónomo y el secado combinado con la molienda preliminar, describiendo esquemáticamente algunas instalaciones típicas. Trata, por último, de la instalación y funcionamiento de los diversos sistemas de secado, destacando los problemas relativos al accionamiento, alimentación, descarga, calentamiento y despolvoreamiento, señalando la tendencia actual a favor de las instalaciones combinadas de molienda preliminar con secadores de corriente ascendente de gases calientes, casi siempre procedentes de los hornos rotativos.*

### 1. Las operaciones de secado y molienda

No es necesario ser prolijo para ponderar la importancia que tienen las operaciones de secado y molienda en la industria del cemento. Ambas tienen general aplicación cuando se emplean combustibles sólidos en los hornos rotativos, tema que ya fue tratado y debatido durante la celebración de los terceros Coloquios, en mayo de 1960.

Cuando en la fabricación del cemento se sigue la llamada vía seca, es bien sabido que la molienda fina es tan sólo realizable si va precedida o acompañada del secado de las materias primas.

Así, pues, las operaciones de secado y molienda son concomitantes y de gran importancia industrial, abarcando problemas tan vastos que, forzosamente, tendremos que limitar y resumir si pretendemos ser fieles a las directrices que informan los actuales Coloquios.

El tema será dividido en dos partes:

- I. Secado y molienda preliminar en la industria del cemento.
- II. Molienda fina, conjunta o subsecuente al secado.

En la primera parte trataremos del secado autónomo o combinado con la molienda preliminar.

La segunda parte tratará de la molienda en circuito cerrado, conjuntamente o no con el secado y la molienda en circuito abierto de materiales previamente secos.

## 2. Generalidades sobre el secado

La definición académica del verbo *secar* es: extraer la humedad de un cuerpo, entendiendo por *humedad* el agua que lo impregna. Seguir estas definiciones en cadena nos llevaría muy lejos y, acaso, nos desviase de la exactitud de los conceptos, ya que los progresos de la investigación científica no siempre van acompañados de un paralelo avance del pobre y confuso glosario de la Técnica, permanentemente falta de un vocabulario genuino y de general y correcta aceptación.

Se sabe que, en los materiales húmedos, el agua no se limita, apenas, a impregnarlos, sino que se presenta bajo cinco tipos estructurales diferentes:

- 1.º Agua libre, retenida por oclusión, con tensión de vapor prácticamente igual a la del agua pura.
- 2.º Agua fijada por disolución o solvatación en la fase sólida.
- 3.º Agua fijada por capilaridad, con tensión de vapor dependiente del tamaño de los capilares y del estado higroscópico del ambiente.
- 4.º Agua fijada por adsorción en la superficie de la fase sólida.
- 5.º Agua combinada químicamente, formando parte de la red estructural de las moléculas de los sólidos.

El secado industrial pretende la eliminación total o parcial del agua contenida en los cuatro primeros tipos estructurales, excluida el agua combinada químicamente.

Un ensayo de laboratorio en una balanza termogravimétrica nos puede dar una idea bastante aproximada de las formas predominantes del agua contenida en un material húmedo, así como de la cantidad de calor teóricamente necesaria para alcanzar el grado de secado que se desee.

El secado es, en resumen, un fenómeno térmico debido a la transferencia de calor de una fase gaseosa a una fase sólida. Entre las variables de que esta transferencia depende, citaremos:

- a) Diferencia de temperatura entre las dos fases.
- b) Superficie de contacto entre ambas fases.
- c) Masas de cada fase en presencia por unidad de tiempo.

Como sea que las operaciones de secado se realizan, generalmente, a temperaturas relativamente bajas, se puede decir que la casi totalidad del calor transmitido a los sólidos lo es por convección. Recordando que esta forma de transmisión es función de la velocidad del gas

$$c = a v^n$$

vemos que habrá que disponer de una masa de gases calientes suficiente y en rápida circulación por el circuito de secado.

El calor cedido por los gases se invierte en el calentamiento de los sólidos, en el calentamiento y evaporación del agua por los dichos sólidos transportada y en el calentamiento del circuito de secado, con sus inevitables pérdidas por radiación. Después de todas estas pérdidas, los gases mantienen una temperatura superior a la de los sólidos que tienen en contacto. El calor específico de los gases, a presión constante, tratándose de una mezcla de  $O_2$ ,  $N_2$  y  $CO_2$ , es de 0,25 kilocalorías/kg °C. Los sólidos constituyentes de los crudos poseen calores específicos del mismo orden, entre 0,21 y 0,24 kcal/kg °C, lo que, en primera aproximación, nos dice que debemos disponer de masas de gases equivalentes a las de los sólidos.

El calor de evaporación del agua, a la presión normal, es de unas 640 kcal/kg, pero el calor invertido en el secado de un kilogramo de agua de humectación es bastante mayor. Los rendimientos térmicos suelen ser del orden de 50 por 100, lo que es bastante satisfactorio en la industria del cemento.

La pérdida de agua por secado se calcula fácilmente determinando las humedades inicial,  $H$ , y final,  $h$ , del producto:

$$E = \frac{(100 - h)H - (100 - H)h}{100 - h} = 100 \frac{H - h}{100 - h}$$

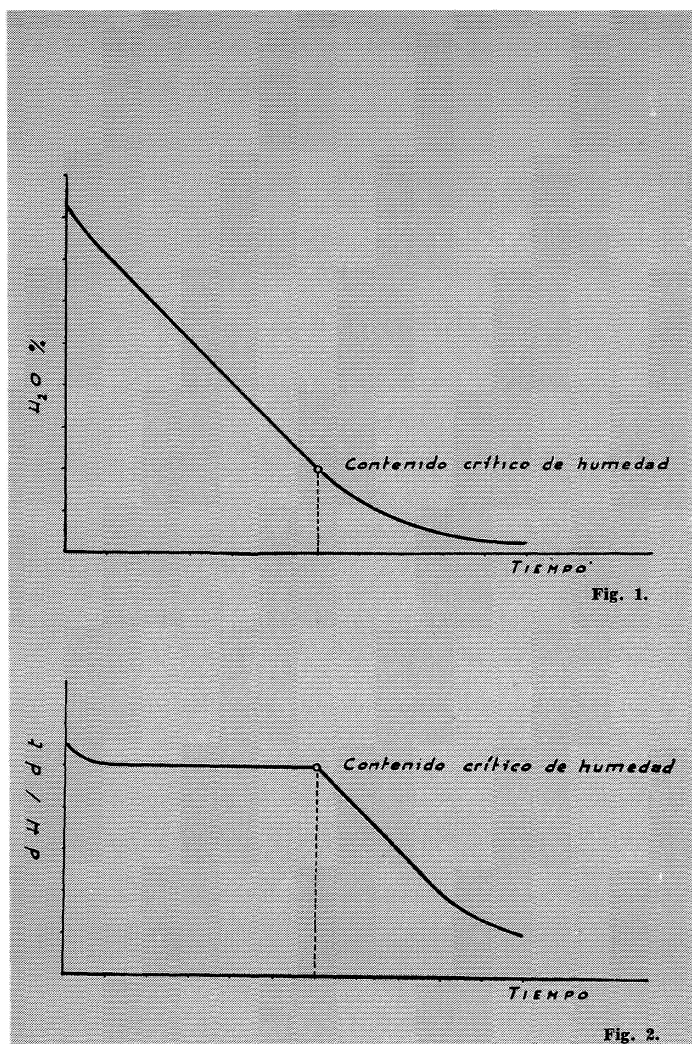
La pérdida de agua no suele ser una razón directa del tiempo de secado. Representando gráficamente esta operación (fig. 1) se observa una tendencia asintótica en la curva resultante.

Llamando *intensidad de secado* a la derivada de la pérdida de humedad en función del tiempo,

$$i = \frac{dH}{dt},$$

al trazar la curva correspondiente (fig. 2) vemos que se mantiene casi constante durante un cierto tiempo y, pasado un punto determinado, la intensidad de secado disminuye rápidamente, lo que indica la dificultad que hay—industrialmente—en alcanzar un secado total y absoluto.

Existe, pues, un *contenido crítico de humedad* para cada producto, pasado el cual no hay compensación económica o técnica en continuar el secado. Es más, se ha demostrado que la molienda fina del crudo o del clínker se realiza mejor cuando los materiales poseen un pequeño contenido de humedad.



que menospreciar la idea de que, en un futuro, los métodos citados y otros todavía menos ortodoxos puedan ser utilizados en las operaciones de secado.

### 3.1. Secadores rotativos simples

Se pueden considerar como los pioneros en el ramo industrial que nos ocupa y, pese a su abo-  
lengo, continúan siendo ampliamente usados. Los secadores rotativos simples y con calenta-  
miento directo se construyen en diámetros variando entre 1 y 3,5 m y longitudes de 4 a 25 m.  
Consisten en tambores ligeramente inclinados (fig. 3), soportados por rodillos y accionados por  
un moto-reductor unido a un piñón y a una corona dentada. La inclinación es de 2,5 a 5 por  
100, y la velocidad tangencial de 0,2 a 0,8 m/s. La salida de gases puede ser por tiro natural  
o por un sistema forzado a base de un exhaustor unido a un aparato despolvoreador, general-  
mente uno o varios ciclones.

El tiempo de permanencia del material en un secador rotativo es función directa de la longi-  
tud del tambor e inversa de la inclinación y de la velocidad tangencial. Para aumentar el tie-  
po de permanencia de los sólidos en el secador y, asimismo, para incrementar las condiciones  
de transmisión del calor, en el interior del tambor se suelen introducir diversos dispositivos que  
van desde simples aletas soldadas a la superficie interna del tambor, que sirven para levantar y  
agitar el lecho del material, hasta cruces, cuadrantes, inserciones radiales y complicados cana-  
lículos verdaderamente laberínticos (fig. 4).

Digamos, a favor de los tambores secadores simples, la economía de su construcción, mante-  
nimiento y conservación. Los costes de explotación suelen ser más bajos que para los secadores  
de otros tipos, principalmente cuando los anexos interiores no son complicados y, por ello,  
fáciles de reparación.

### 3. Secado autónomo

El secado autónomo en la in-  
dustria del cemento se efectúa  
siempre en aparatos de alimen-  
tación continua y de gran ca-  
pacidad de secado, y entre ellos  
nombraremos:

- Secadores rotativos.
- Secadores estáticos con agitación interna.
- Secado en separadores cen-  
trífugos.
- Secado en corriente ascen-  
dente de gases calientes.

Como fuentes de calor se tie-  
nen:

- Gases calientes proceden-  
tes de un hogar donde se  
queman combustibles sólidos o líquidos.
- Gases procedentes de los  
hornos de cemento.

El empleo de resistencias eléc-  
tricas, rayos infrarrojos y otros  
medios de calentamiento no ga-  
seosos no ha tenido, que sepa-  
mos, cualquier aplicación en  
escala industrial, pero no hay



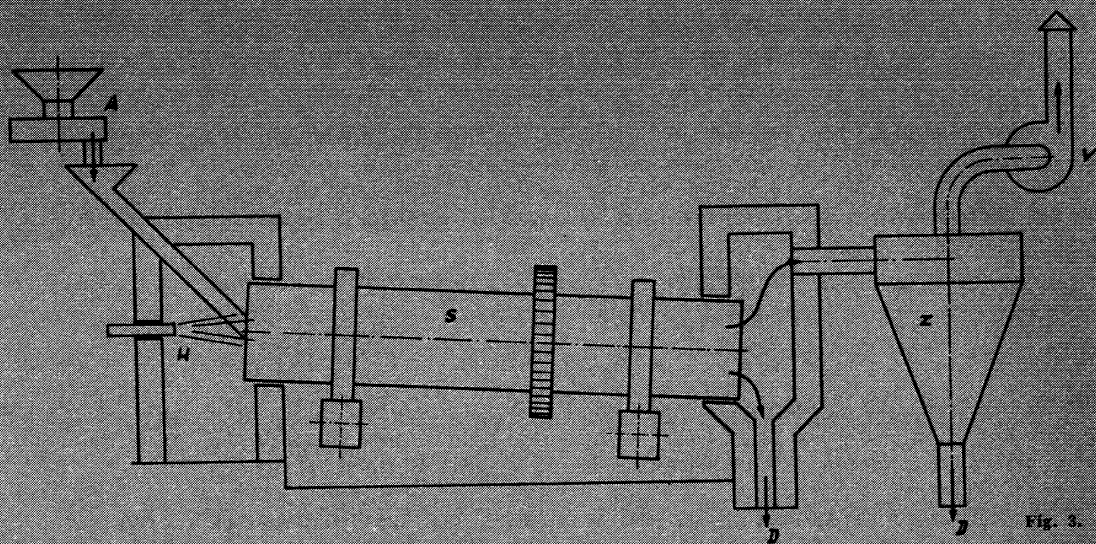


Fig. 3.

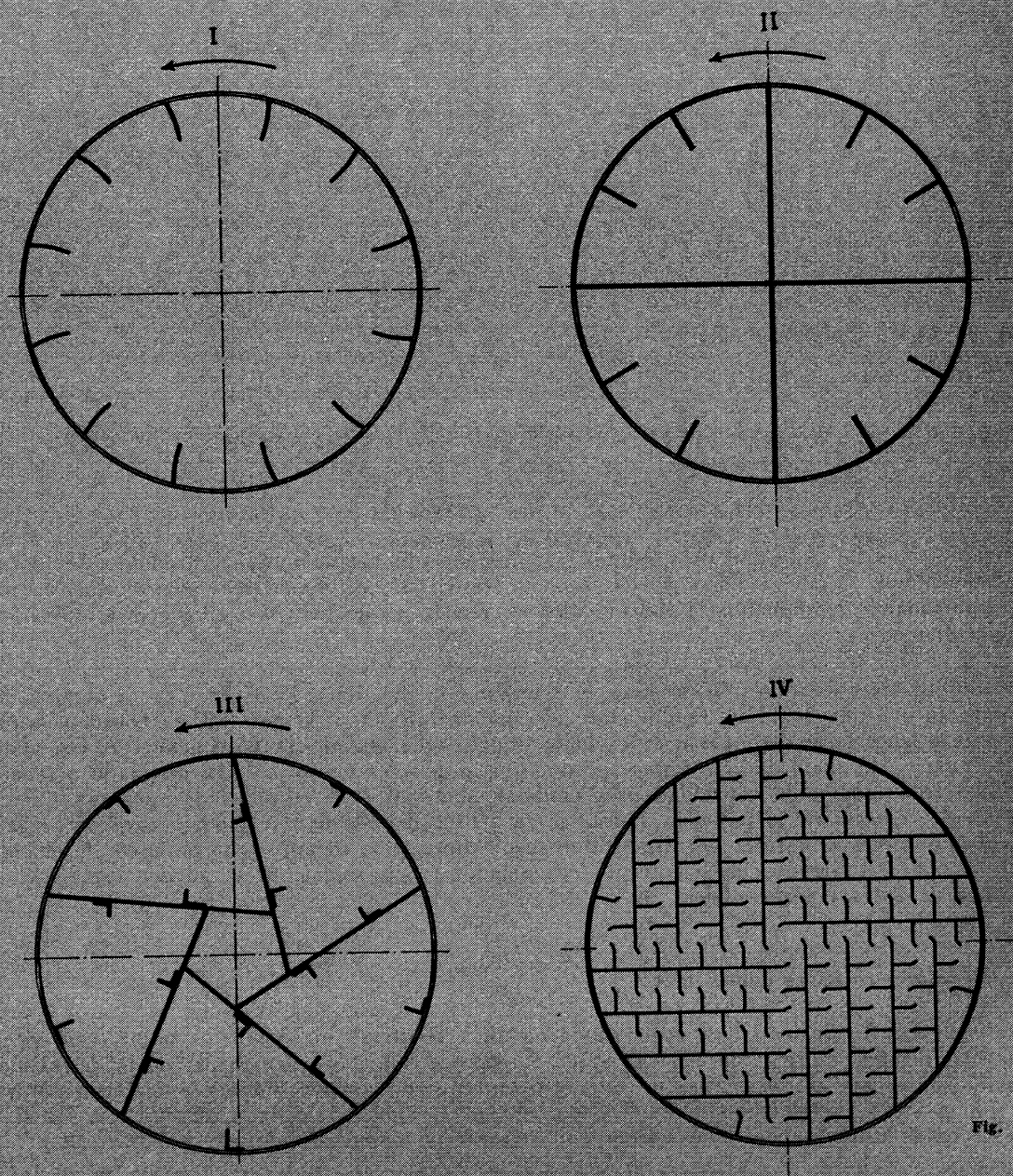


Fig. 4.

La capacidad de secado, en primera hipótesis, se estima en función de su superficie lateral. Según Labahn, para el carbón la intensidad de secado es de 5 a 9 kg m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>, y para la caliza de 12 a 24 kg m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>. Estas intensidades pueden ser bastante aumentadas forzando la velocidad de paso de los gases calientes. Así, en un secador Millar's, para la caliza se tiene:

Humedad inicial	Intensidad de secado
2 %	26 kg m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup>
4 %	37 kg m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup>
6 %	40 kg m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup>

En ciertos tipos de secadores la complejidad interior consiente grados de llenado de 1/4 a 1/3 del volumen interior. En tales casos la intensidad de secado depende más bien del volumen del tambor. Por ejemplo, en los secadores Buell, sistema Buttner, se tiene:

Diámetro m	Longitud m	Superficie m <sup>2</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	INTENSIDADES DE SECADO		
				kg hr <sup>-1</sup>	kg m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup>	kg m <sup>-3</sup> hr <sup>-1</sup>
2,10	10,4	68,6	36,0	2.620	37,8	72,0
2,20	11,0	76,0	41,8	3.010	39,6	72,0
2,40	12,0	90,5	54,2	3.900	43,2	72,0
2,60	13,0	106,2	69,0	4.970	46,8	72,0
2,80	14,0	123,1	86,4	6.220	50,4	72,0
3,25	16,5	168,4	136,9	9.850	58,5	72,0

o sea:

$$c = k V$$

siendo:

$$k = 72 \text{ kg hr}^{-1} \text{ m}^{-3} (\text{H}_2\text{O})$$

En un cilindro de revolución:

$$V = \frac{D S}{4}$$

luego:

$$c = \frac{k}{4} D S$$

resultando que la capacidad de secado,  $c$ , es directamente proporcional al producto de la superficie lateral,  $S$ , por el diámetro del secador rotativo,  $D$ , de donde se concluye que se obtendrán mejores rendimientos, siendo iguales los demás parámetros, con secadores rotativos de mayor diámetro.

En este tipo de secadores se precisan, por término medio, unas 1.300 kcal/kg de agua evaporada, lo que representa un rendimiento ligeramente inferior a 50 por 100. El consumo aproximado de energía es de 1 kWhr/t—excluido el exhaustor cuando la circulación de los gases es forzada—, de modo que el tambor secador simple debe equiparse con un motor de potencia en kilovatios igual a la capacidad proyectada de material seco en toneladas por hora. Para el cálculo riguroso de la potencia a instalar en un secador rotativo se pueden emplear las conocidas fórmulas empíricas del U. S. Bureau of Mines, pero siempre se tropieza con la dificultad de aparecer algunos coeficientes indeterminados y que solamente se pueden establecer a la vista de datos experimentales.

### 3.2. Secadores rotativos dobles

Consisten (fig. 5) en dos cilindros de chapa metálica resistente al fuego, dispuestos concéntricamente, dejando entre sí un espacio anular. Los gases calientes—procedentes de un hogar auxiliar o del escape de los hornos de cemento—entran por el cilindro interior a una temperatura de 700 a 750° C, retrocediendo después, por el espacio anular al exterior, debido a la circulación forzada causada por un exhaustor con su correspondiente dispositivo despolvoreador.



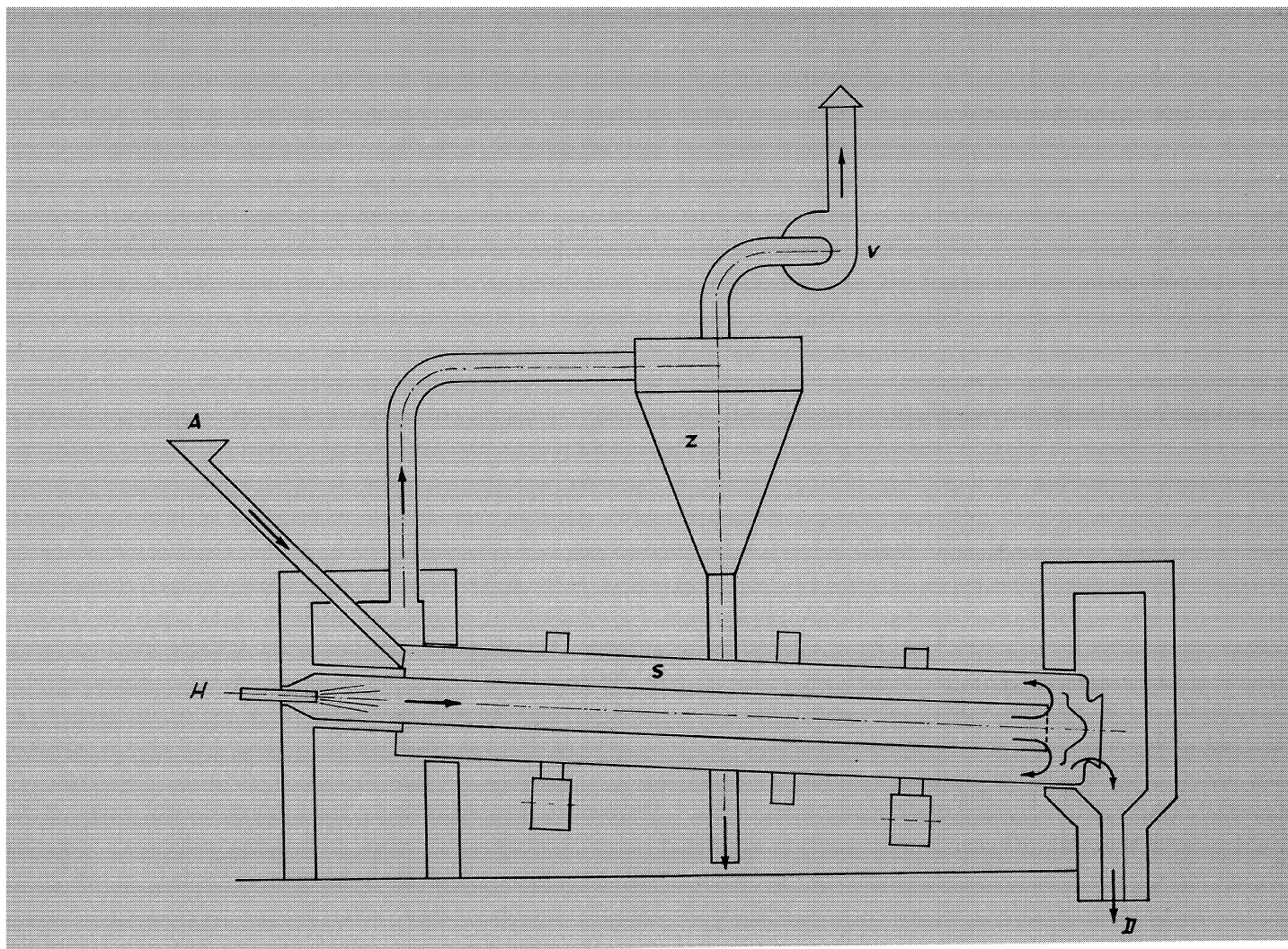


Fig. 5.

Cuando se trata de secar productos finos y que no convenga exponerlos al contacto directo de los gases calientes—como es el caso del lignito en polvo—, éstos tan sólo circulan por el cilindro interior y la transmisión de calor se logra, exclusivamente, por conductividad a través de la chapa metálica.

Cuando el material a secar no exige precauciones especiales, los gases efectúan el recorrido de ida y vuelta, consiguiéndose, con ello, una reducción de longitud en relación a los secadores simples y, asimismo, un aumento de rendimiento térmico, que puede ser de 50 a 70 por 100.

### 3.3. Secadores rotativos triples

Consisten en tres tambores coaxiales ligeramente cónicos. Un modelo de ellos, denominado «Triplex», ha sido desarrollado por la casa Pfeiffer, que lo construye en seis tamaños diferentes, comprendidos entre 1,25 y 3,6 m y longitudes de 1,6 a 4,5 m (fig. 6).

La característica principal de los secadores triples es su menor longitud en relación a los simples, puesto que se consigue una reducción aproximada de unos  $2/3$ . También son, en consecuencia, menores las pérdidas por radiación, alcanzándose un consumo de calor de 900 kcal/kg de agua evaporada, con intensidades de secado de  $64 \text{ kg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$  de agua.

La humedad residual es de 1 por 100 con productos que contengan 15 por 100 de humedad a la entrada. La velocidad de rotación suele variar de 3 a 15 vueltas por minuto, según la humedad del material a secar. Como en todos los casos, se pueden utilizar gases de un hogar auxiliar o del escape de los hornos. El tiro es siempre forzado, siendo imprescindible la instalación de un colector de polvo.

#### 3.4. Secadores estáticos con agitadores de eje horizontal

El sistema fue introducido en 1943 por Aldo Andreas y realizado por Hazemag. El cuer-

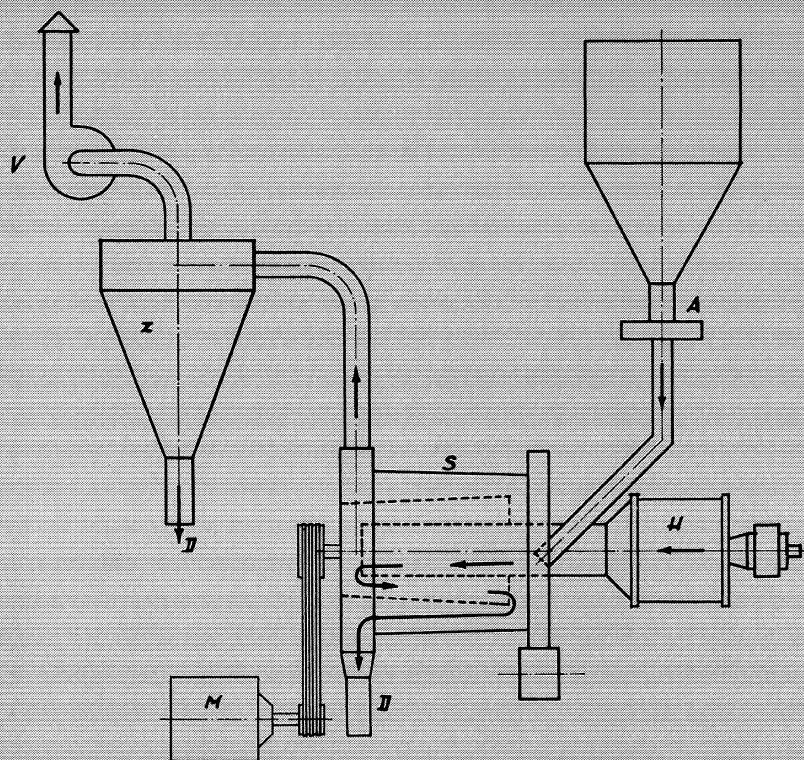


Fig. 6.

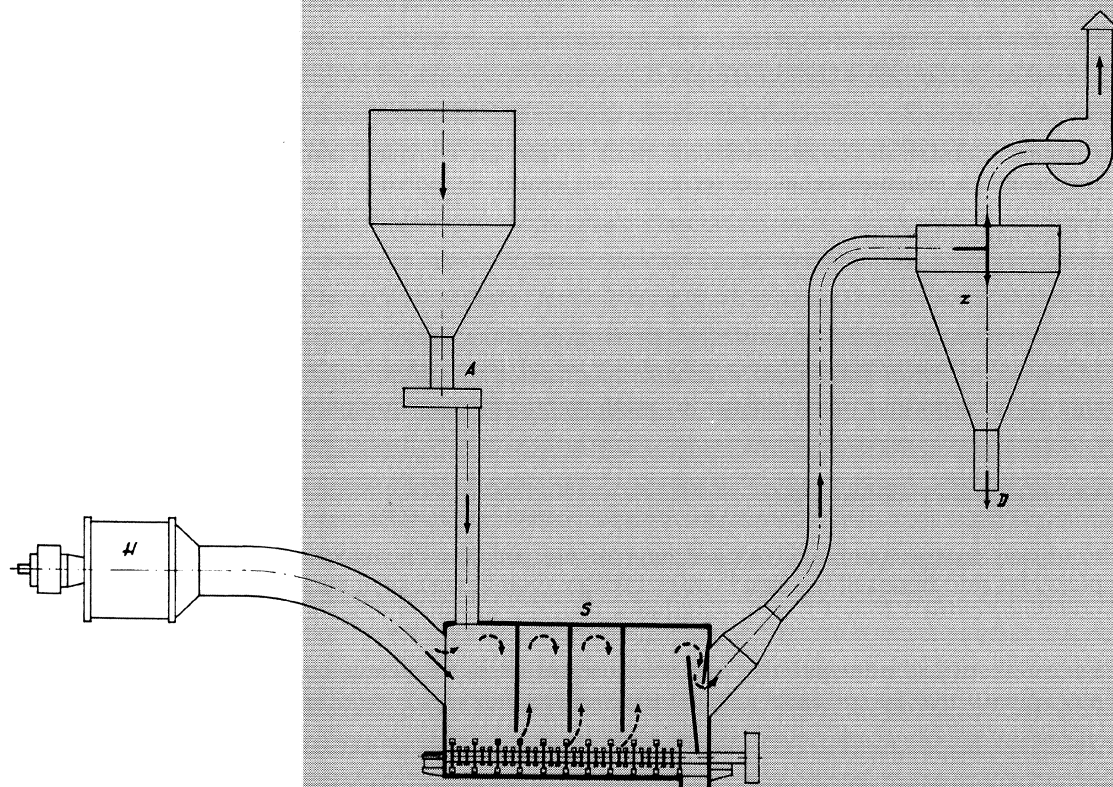


Fig. 7.



po del secador consiste (fig. 7) en una carcasa metálica en cuyo interior se mueven uno o dos ejes rotativos provistos de paletas agitadoras, de gran resistencia al desgaste, que remueven y empujan en el sentido de la salida al material que se pretende secar. Los gases calientes atraviesan el sólido pulverulento y en agitación permanente, provocando la rápida evaporación del agua gracias a la gran superficie de contacto entre las dos fases.

El consumo de calor es, como en los secadores triples, de 900 a 950 kcal/kg de agua evaporada. Se construyen varios modelos, cuyas dimensiones límites son las siguientes:

Longitud ... ..	2 a 9 m
Diámetro ... ..	0,9 a 4,25 m
Altura ... ..	1,3 a 5,1 m
Potencia ... ..	5 a 80 kW
Capacidad de evaporación ... ..	85 a 6.000 kg/hr (H <sub>2</sub> O)

### 3.5. Secadores estáticos con agitadores de eje vertical

Son los llamados secadores verticales, constituidos, generalmente, por una torre cilíndrica interiormente dividida en varios pisos o compartimientos formados por platillos perforados sobre los cuales se mueven agitadores girando alrededor de un eje vertical. El material húmedo entra por la parte superior a través de un alimentador provisto de una esclusa celular. Desciende de uno a otro platillo y sale, ya seco, por la parte inferior. Los gases calientes entran, precisamente, por la parte inferior y circulan a contracorriente, siendo extraídos por el acostumbrado conjunto de ciclón y exhaustor.

Una variante de gran interés, especialmente apta para el secado de barros o de lodos carbonosos, la constituye el turbo-secador sistema Buttner (fig. 8), construido por Edgar Allen. Comprende una turbina de aire de tres elementos en un canal axil, la cual imprime a los gases calientes un movimiento ascendente en serpentina. El rendimiento térmico de estos secadores alcanza 75 por 100.

### 3.6. Secado en separadores centrífugos

El separador centrífugo, con circulación de aire, fue patentado en 1885 por los ingleses Mumford y Moodie y construido en Alemania por Pfeiffer en 1888. Con una edad de casi ochenta años son actualmente construidos por diversas firmas en varios Continentes. Las características más importantes de los primeros separadores centrífugos subsisten en los más recientes modelos, siendo éstas (fig. 9):

- Una rueda de álabes, que actúa como ventilador y engendra la corriente de aire circulante.
- Un disco horizontal, que recibe el material entrante y lo esparce por centrifugación.
- Una cámara exterior, donde se separa el material fino.
- Un sistema de aletas guías, que regula la finura de los materiales separados.
- Una cámara interior, donde se reúnen los gránulos de mayor tamaño.

Caso curioso: las dimensiones de los separadores de aire son determinadas por la experiencia, y su establecimiento es absolutamente empírico. Unas tablas de rendimientos publicadas en 1927 presentan datos muy aproximados a los dados por los constructores actuales. Es, siempre, una buena recomendación adoptar un separador con dimensiones algo superiores a las estrictamente necesarias.

Hoy día se construyen separadores con una producción de 80 t/hr de finos, lo que representa una carga circulante superior a 200 t/hora.

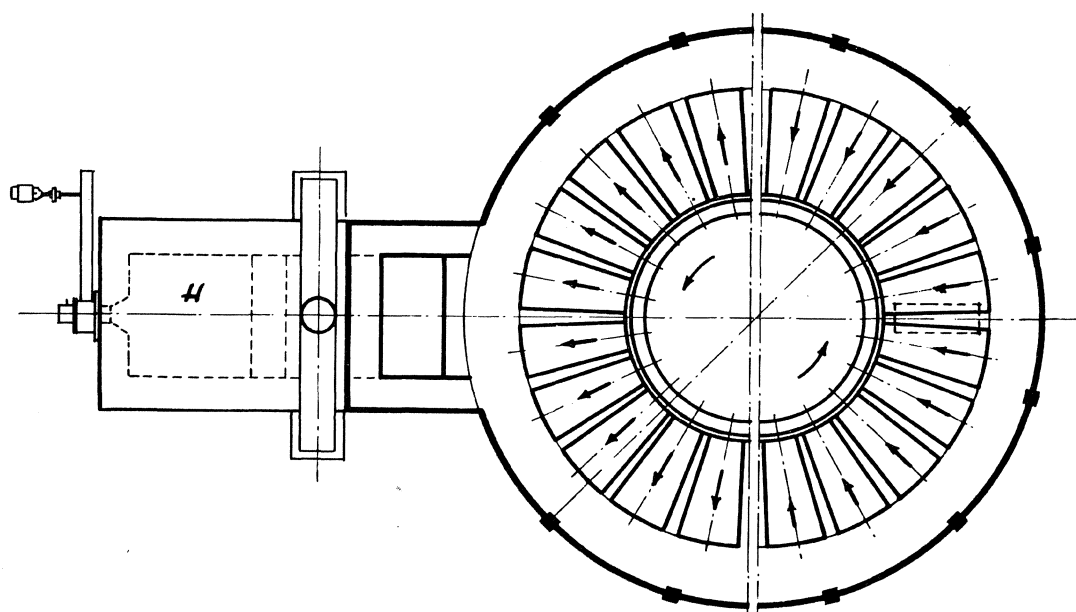
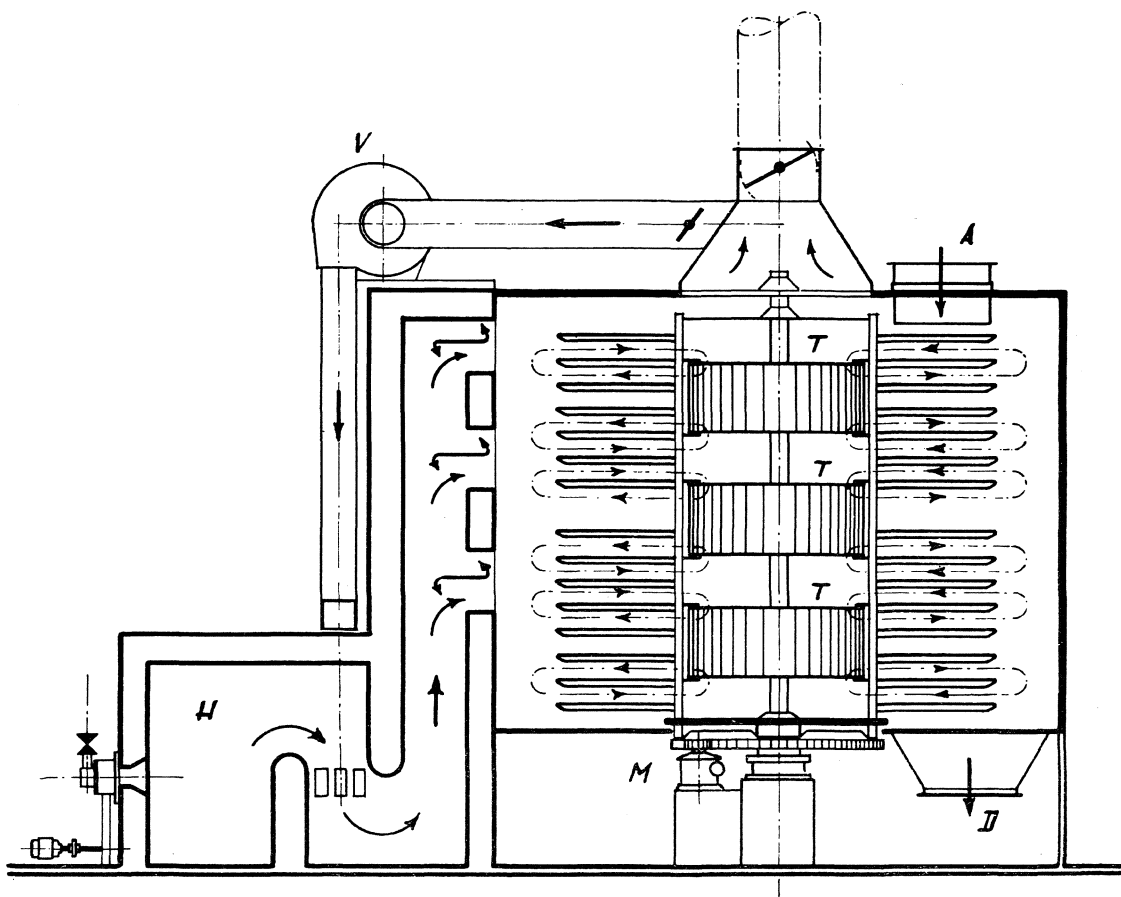


Fig. 8.

Normalmente, los separadores reciben materiales con un contenido máximo de 2 por 100 de humedad. Sin embargo, algunos constructores (Allis Chalmers, desde 1929) han introducido gases calientes en el separador centrífugo, los cuales se incorporan a la corriente circulante y son expelidos después de haber transmitido parte de su calor a las partículas sólidas en suspensión. Como es natural, las partículas menores secan antes, de modo que los finos separados están prácticamente secos.

En este caso, el separador rotativo pasa a ser una especie de turbo-secador; pero como el rechazo de los gránulos de mayor tamaño todavía retiene bastante humedad residual, el separador no puede funcionar como secador autónomo, sino integrado en circuitos de molienda que serán posteriormente descritos.

### 3.7. Secado en corriente ascendente de gases calientes

El principio del intercambiador de calor por suspensión en gases calientes tiene amplia aplicación en el campo del secado de materiales. La realización es bastante simple y está esquematizada en la figura 10, representando el secador rápido selectivo construido por Hazemag. Los gases calientes se introducen en un tubo vertical por un codo calorifugado. El material a secar penetra en la base del tubo vertical mediante un alimentador estanco, entrando en contacto turbulento con la corriente ascendente de gases calientes, siendo conducidos a la cabeza cónica del secador, donde la velocidad del flujo disminuye. Las partículas húmedas, más pesadas, permanecen más tiempo en contacto con los gases calientes. Los gránulos secos son conducidos a un ciclón de alto rendimiento.

La velocidad de los gases debe

ser siempre mayor que la de las partículas sólidas en caída libre. Prácticamente, se trabaja con flujos ascendentes a la velocidad

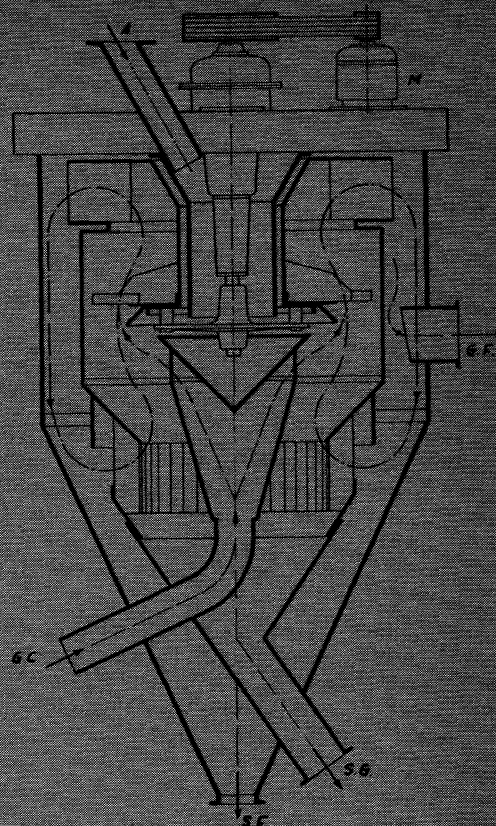


Fig. 9.

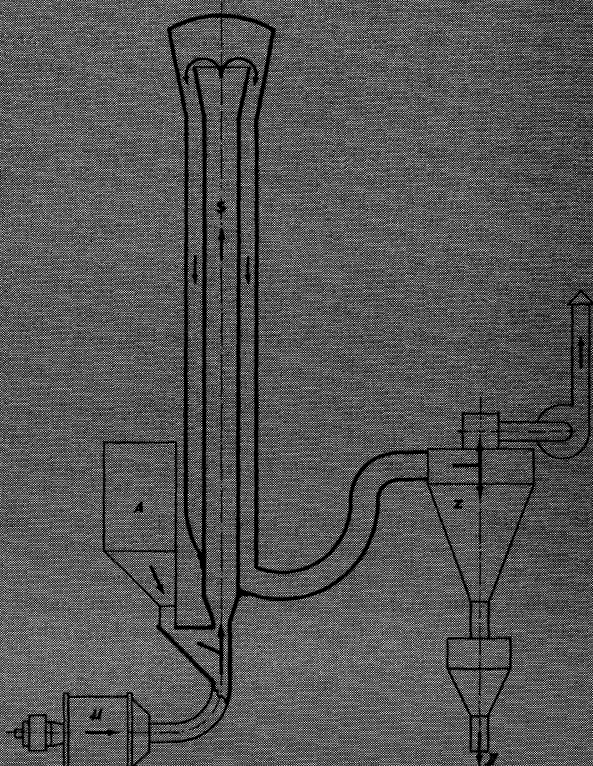


Fig. 10.



de 20 a 25 m/s. Las condiciones de transmisión de calor son muy satisfactorias, principalmente en lo que a la rapidez del secado se refiere. Por este motivo, se conocen algunos tipos de secadores en corriente de gases ascendente por los nombres de «jet dryers» (secadores de chorro) o «flash dryers» (secadores relámpago). El consumo de calor es de 850 a 900 kcal/kg de agua evaporada.

Como en el caso anterior, los secadores de este tipo suelen estar integrados en instalaciones de molienda primaria en circuito cerrado, siendo apenas posible su montaje autónomo cuando se manipulan productos bastante finos.

#### 4. Secado combinado con la molienda preliminar

Entendemos por molienda preliminar aquella que proporciona un material tal que, por su falta de finura, no puede ser directamente aplicado al fin que se destina. En el caso de un crudo para cemento portland, después de la molienda preliminar, carece todavía de la finura necesaria para poder pasar directamente a los hornos. La molienda preliminar puede afectar a uno solo de los componentes del crudo, por ejemplo a la caliza, y, en este caso, a la falta de finura se une la falta de composición adecuada.

Distinguimos la molienda preliminar de la trituración o machaqueo, porque esta última, en general, proporciona un producto cuyas partículas mayores pueden alcanzar tamaños de hasta 50 o más milímetros. El material triturado a dicho tamaño suele constituir la alimentación propia, tanto de los secadores autónomos, como de los secadores combinados con la molienda preliminar.

El secado combinado con la molienda preliminar obedece a una curiosa simbiosis. De una parte, el molino—que en general gira a gran velocidad—actúa como agitador del material a secar y reduciendo el tamaño de los fragmentos, aumenta su superficie de contacto con los gases calientes y la intensidad de secado. De otra parte, la corriente de gases calientes que circula, al evaporar una parte del agua contenida en la materia prima, aumenta considerablemente su molturabilidad y reduce la posibilidad de que ésta se pegue y aglomere en los órganos fijos o móviles del molino hasta anular las condiciones indispensables para su funcionamiento.

Las instalaciones de secado y molienda trabajan, casi siempre, en un circuito cerrado que comprende, en síntesis, un generador de gases calientes, un molino abierto que permite la circulación de gases en su interior, una cámara de secado, un separador de materiales secos y uno o más ventiladores que aseguran la circulación de gases por el circuito.

##### 4.1. Secado combinado con molinos de impacto

El montaje más simple del secado combinado comprende un molino de martillos o de impactos (figura 11) con un rotor girando a gran velocidad, penetrando los gases calientes por la parte inferior del molino y saliendo por la parte superior, conjuntamente con los finos.

Hazemag construye molinos de este tipo con capacidad de producción comprendida entre 2,5 y 120 t/hr, evaporando de 450 a 12.000 kg/hr de agua. Su consumo de calor es de unas 1.000 kcal/kg de agua evaporada, pudiendo ser mayor cuando se pretenden bajos tenores de humedad residual. Así, en un secador combinado con un molino de impactos, alimentando con caliza conteniendo 6 por 100 de humedad inicial, se obtuvo:

Humedad residual	Consumo de calor por kg de agua evaporada
0,5 %	1.100 kcal
0,2 %	1.240 kcal

Una instalación de este tipo ha sido realizada por F. L. Smidth, según el esquema—simplificado—de la figura 12. La cámara de secado consiste en un secador por corriente de gases ascendente, tipo «Flash», recibiendo la materia entrante por el alimentador A, obturado por una rueda celular, no representada. La corriente de gases arrastra inmediatamente las partículas finas de la alimentación, mientras que las mayores se precipitan sobre un molino de impactos situado en la parte inferior del secador, el cual recibe la corriente de gases calientes, procedentes de un hogar auxiliar o de la salida de los hornos rotativos. El molino origina nuevas partículas finas que son arrastradas y un rechazo que cae al fondo de un elevador, el cual lo reintroduce en la cámara vertical de secado. Los finos, ascendiendo con los gases, pasan a un sistema colector de polvo, formado por uno o varios ciclones y, eventualmente, por un filtro de mayor rendimiento. Potentes exhaustores aseguran la circulación de los gases.

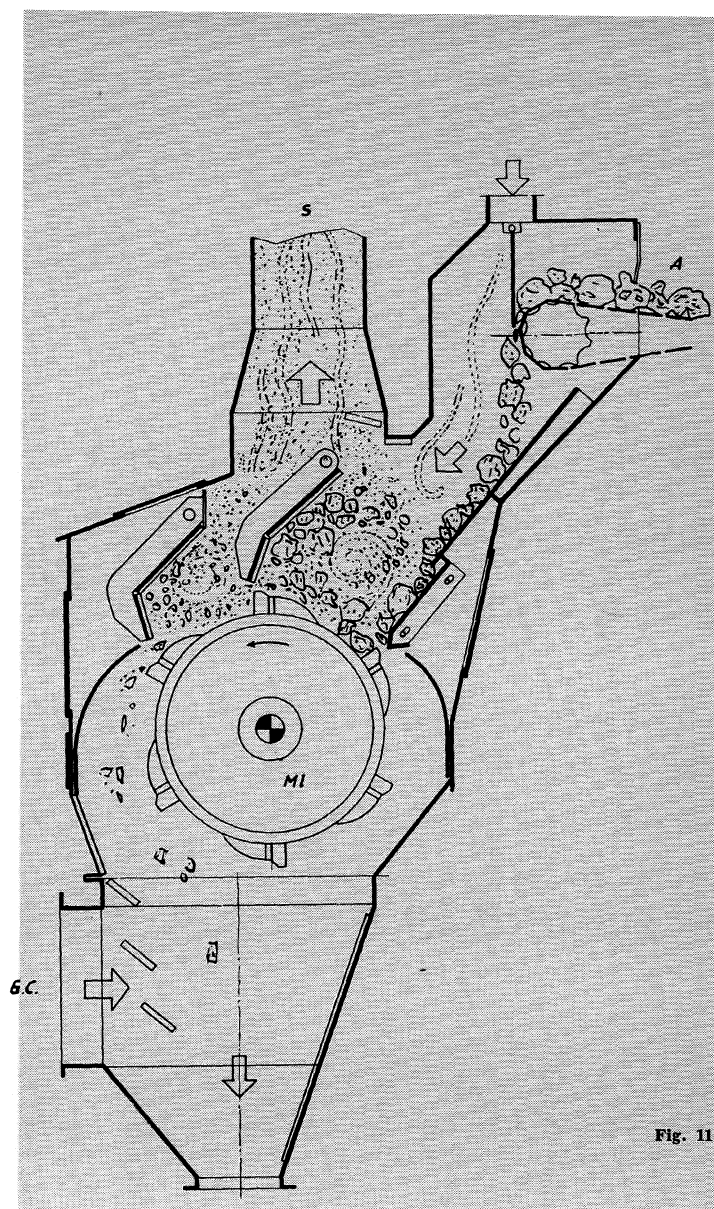


Fig. 11.

Una instalación tal como la descrita recibía una alimentación de 50 t/hr de materias húmedas, con 12 por 100 de agua. Entraba una masa aproximadamente igual de gases de salida de horno a una temperatura de 420° C, saliendo a unos 130° C después del secado. El calor cedido por los gases era de unas 60 kcal/kg, evaporando poco más de 4 t de agua por hora, resultando un consumo de calor de unas 750 kcal/kg de agua evaporada, con un 4 por 100 de humedad residual, suficientemente alta para no excluir una posterior operación de secado y molienda fina.

Se puede mencionar aquí al llamado *secador de manantial* (fountain dryer) sistema Barthelmess, destinado a fragmentar, secar, mezclar, secar y clasificar materiales en una sola operación, con un consumo de 800 a 900 kcal/kg de agua evaporada y 8 kWhr/t de producto acabado. La capacidad de las instalaciones varía de 0,5 a 20 t/hr. Citaremos, finalmente, la combinación de un molino de impactos con secado en «pozo de caída», realizada por Wedag.

#### 4.2. Secado combinado con molienda autógena

Consiste la molienda autógena en la utilización de los fragmentos mayores del material a moler como si fueran cuerpos moledores. Estos, no se suprimen en absoluto, pues se mantiene una



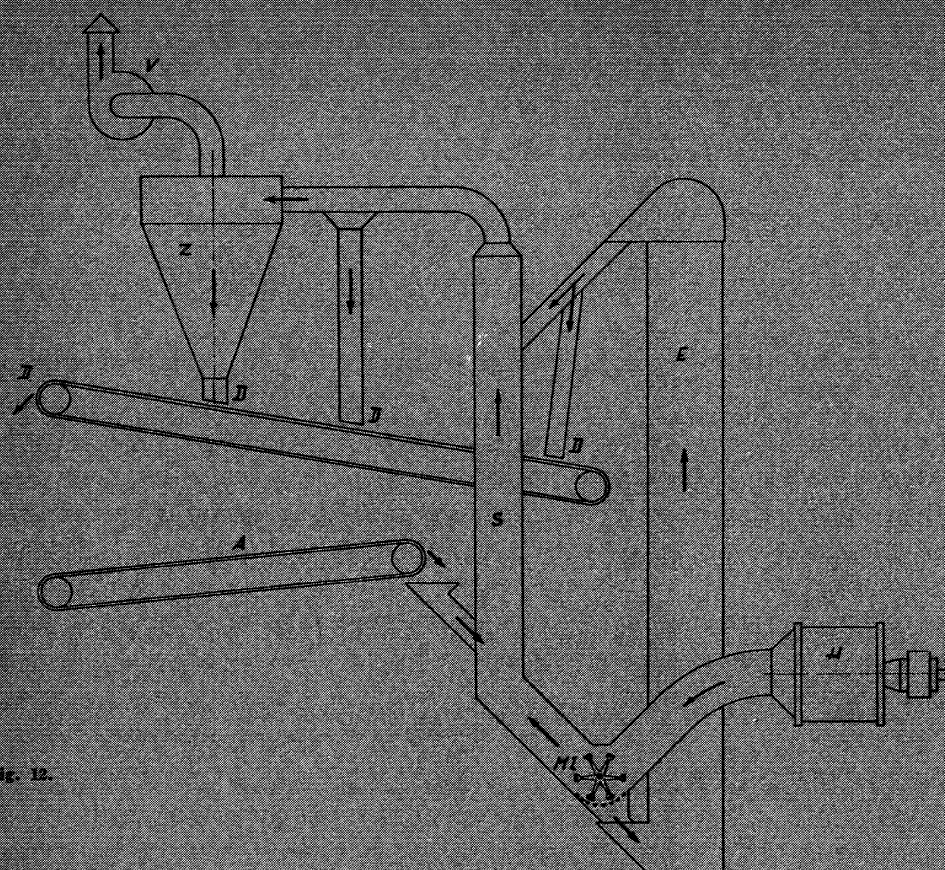


Fig. 12.

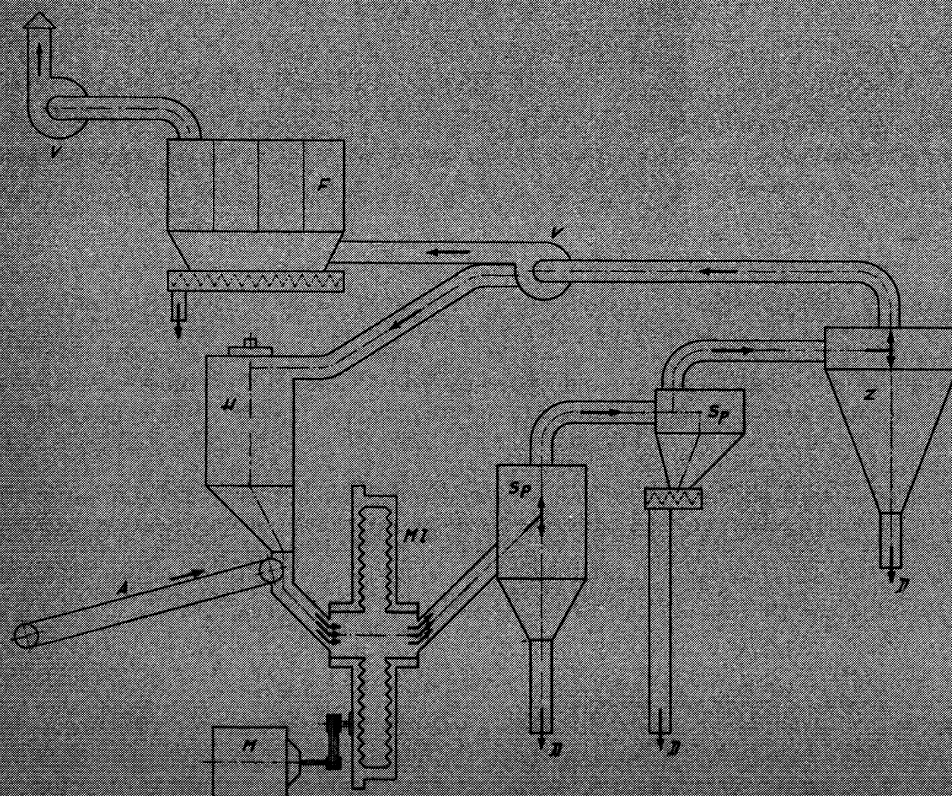


Fig. 13.



pequeña carga auxiliar de ellos, con un henchimiento de 5 a 6 por 100 del volumen total del molino. La molienda autógena se ha venido estudiando desde 1950 y se conoce una patente de 1958 que condujo a la realización industrial del molino Aerofall, con un diámetro que puede llegar a unos 7 m y una longitud mucho menor. La potencia del motor principal alcanza hasta 2.000 kW. El molino gira sobre un eje horizontal con muñones huecos; por uno de ellos entra el material sin machaqueo previo, en torbellino con una corriente de aire. En el interior del molino se encuentran unos salientes en forma de álabes que agitan y levantan el material entrante, provocando un gran número de choques de unos con otros fragmentos y con las escasas bolas de acero que contiene, de modo que rápidamente se secan y muelen las partículas sólidas, siendo arrastradas fuera del molino por el aire circulante (fig. 13).

Una instalación de molienda autógena situada en Cauldon (Gran Bretaña) proporciona de 145 a 150 t/hr de materias secas, evaporando unas 10 t/hr de agua con un consumo de  $96 \times 10^6$  kcal/hr y de 14 a 15 kWhr/t de materias secas. Su elevado consumo energético ha limitado hasta ahora sus aplicaciones a la industria del cemento.

#### 4.3. Secado en molinos de rodillos

Los molinos de rodillos se desarrollaron a partir de 1890. Consisten, esencialmente, en una pista giratoria en forma de cubeta, en cuya periferia se encuentran de dos a seis rodillos, los cuales no llegan a tocar el borde de la cubeta, dejando un espacio libre regulable. Firmes resortes permiten el paso accidental de partículas especialmente duras y gruesas.

Raymond desarrolló un molino de este tipo, empleado inicialmente para la molienda de carbón, pero adaptado posteriormente a la molienda de caliza y otros materiales crudos. Recibiendo una corriente de aire caliente permite admitir materiales con una humedad máxima de 15 por 100.

La regulación del tamaño de partículas se consigue por medio de separadores centrífugos acoplados directamente encima del molino. Uno de los más usados es el llamado «Whizzer» (zumbador), el cual combina los efectos de la fuerza centrífuga provocada por unas aspas giratorias, ligadas al eje vertical del molino, con una corriente ascensional de gases calientes. Por la primera, las partículas mayores regresan al molino; por la segunda, las partículas finas son transportadas al secador y a un sistema apropiado de colectores de polvo.

Los molinos Raymond se construyen en tamaños cuyos límites son:

Diámetro interno de la cubeta	Potencia instalada		Capacidad de producción
	Molino	Exhaustor	
30" (762 mm)	15 CV	15 CV	36 a 54 t/hr
73" (1.852 mm)	600 CV	200 CV	

Un molino con un diámetro interno de 60" (1.524 mm), alimentado con caliza de 5 a 6 por 100 de humedad inicial, proporcionó los siguientes rendimientos:

Finura	Consumo	Producción
99 % inferior a 0,043 mm ... ..	160 kW	5 a 5,5 t/hr
98 % inferior a 0,3 mm ... ..	200 kW	12 a 18 t/hr

Desde 1937 se adaptó al molino Raymond un secador vertical en corriente de gases ascendente, cuyo nombre «Flash» (relámpago) ya es genérico de todos los secadores basados en el mismo principio. El esquema de la figura 14 representa un circuito de molienda-secado comprendiendo un generador de gases calientes, *H*, un molino de rodillos Raymond, *MI*, con su alimentador y su separador «Whizzer», *w*, el secador vertical, *S*, los separadores de polvo, *Z*, con sus descargas, *D*, y los exhaustores, *V*, asegurando la circulación de aire. El exceso de gases en el circuito cerrado es expelido a través de un ciclón denominado concentrador.

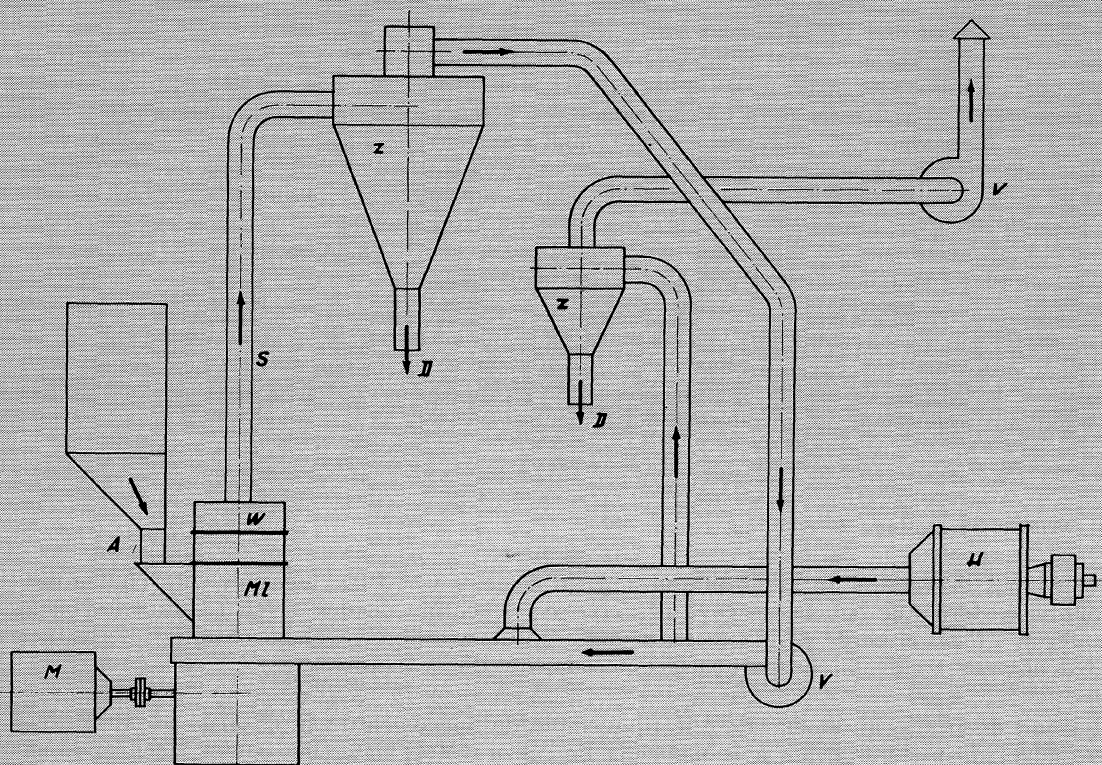


Fig. 14.

En este sistema los gases entran a temperaturas que pueden variar de 200 a 500° C, según su origen. La máxima capacidad de transporte es de 1 kg de sólidos por cada kg de gases calientes y el consumo de calor varía de 750 a 1.000 kcal/kg de agua evaporada.

Un párrafo aparte merece el molino Loesche, introducido en 1928. Comprende dos grandes muelas cónicas, cuyos ejes están fijos sobre balancines, rodando sobre una solera que gira a una velocidad relativamente baja, 3 m/s en la periferia para todos los tamaños (fig. 15). El molino trabaja en corriente de aire y, en la mayoría de los casos, se utilizan gases calientes para conseguir la molienda simultáneamente con el secado. La temperatura de los gases a la entrada del molino puede llegar a 400° C y la intensidad de secado es tal que ya se notan sus efectos a escasos centímetros de altura sobre la solera. Encima del molino se encuentra un clasificador, consistente antes en una criba rotatoria, pero actualmente se ha adoptado el sistema americano de paletas giratorias, análogo al separador «Whizzer». El molino Loesche puede aplicarse —como otros de su género— a la molienda de carbón, de materiales crudos, etc., permitiendo una amplia regulación de la finura hasta el punto de ocupar un lugar intermedio entre la molienda preliminar y la molienda fina. Los tamaños son muy varios. Uno de los mayores, el LM 20, alimentado con caliza semi-dura con 8 por 100 de humedad inicial produce unas 50 toneladas/hora de material seco, con 10 por 100 de residuo sobre un tamiz de 0,09 mm. El consumo de energía es de unos 15 kWhr/tonelada.

Diversos molinos, como el «Rema», con el anillo de fricción y los rodillos situados en un plano vertical; el «Babcock y Wilcox», de ruleta; el «Fuller», también de ruleta, y otros, se pueden adaptar a circuitos de molienda y secado, siendo especialmente propios para el tratamiento de carbones destinados al calentamiento de hornos rotativos.

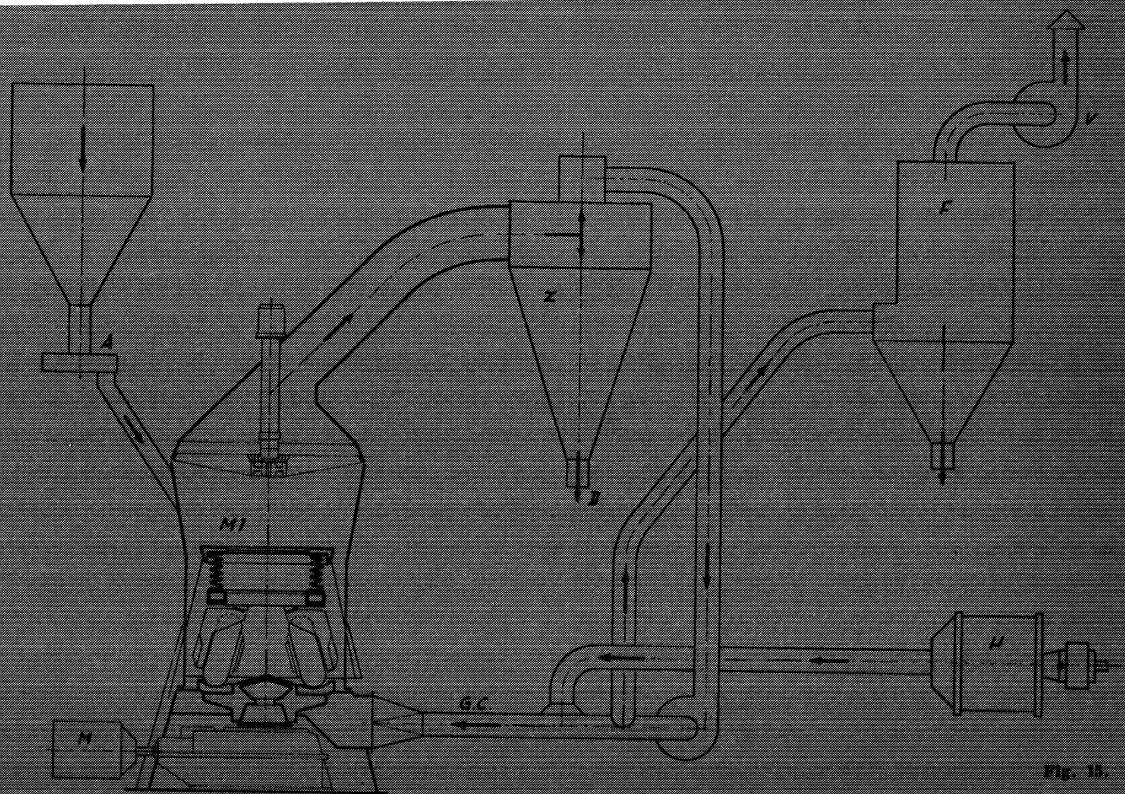
#### 4.4. Secado y molienda en lecho fluidificado

Los lechos fluidificados fueron introducidos en 1921, en Alemania, para la gasificación de carbones. En 1943 se aplicó el lecho fluidificado en operaciones catalíticas de la petroquímica. En 1961, en el curso de experiencias sobre el secado de minerales de hierro en lecho fluidificado se pensó en la posibilidad de combinar esta operación con una molienda simultánea haciendo girar en el seno del lecho fluido un móvil igual a una caja de molino «Carr». Después de varios ensayos, en 1964, se ha llegado a una realización industrial que permite el secado y la molienda conjunta de los finos de carbón, careciendo, por el momento, de datos relativos a los rendimientos de una instalación que, por su novedad, puede adquirir gran importancia en un próximo futuro.

#### 5. Montaje y funcionamiento de las instalaciones de secado

Cualquiera que sea la instalación de secado adoptada, su montaje ha de tener en cuenta los principios siguientes:

- a) Accionamiento.
- b) Calentamiento.
- c) Alimentación.
- d) Descarga.
- e) Despolvoreamiento.





### 5.1. Accionamiento

El accionamiento de las instalaciones de secado es, obviamente, por medio de electromotores. No hay que considerar, apenas, el motor del aparato principal, sino la totalidad de los motores necesarios para el conjunto de la instalación, y de ellos deducir el consumo real en kWhr/t. Habrá que examinar los precios unitarios de la energía eléctrica y de la energía térmica para saber hasta qué punto podemos aumentar el consumo de la primera a favor de economías obtenidas en la segunda.

La instalación eléctrica debe ser estanca y protegida contra los polvos y humedades, y los electromotores siempre blindados. Para los ventiladores y exhaustores se imponen los motores con arranque estrella triángulo o de rotor bobinado. Menos usados son los motores de velocidad variable.

### 5.2. Calentamiento

Como reiteradamente se ha dicho, el calor necesario para el secado puede proceder de un hogar apropiado, provisto de un quemador de carbón o de aceites pesados (con tendencia ligeramente a favor de los últimos), de la salida de los hornos de cemento, o bien del exceso de aire caliente de los enfriadores de clínker. En todo caso, es imprescindible el montaje de un hogar auxiliar para suplir la falta eventual de gases de recuperación.

De hecho, la recuperación de gases está condicionada a la cantidad y a la temperatura de los mismos. Los hornos rotativos modernos, de elevado rendimiento térmico, pueden dar una cantidad insuficiente de gases y a una temperatura bastante baja que no haga compensatorio su empleo.

La tendencia actual, en las nuevas instalaciones, consiste en el aprovechamiento de los gases de los hornos rotativos, procurando que la distancia entre hornos y secadores sea la menor posible, a fin de evitar costosas instalaciones calorifugadas.

También se tienen en cuenta las posibilidades de montaje de las instalaciones de alimentación y descarga con un mínimo de elementos mecánicos. El sistema de secado combinado con la molienda goza de indudable preferencia y, en este caso, se impone el montaje de secadores verticales con corriente ascendente de gases calientes.

Estas adaptaciones no siempre son posibles o económicamente recomendables en fábricas ya construidas, por lo que suelen continuar en uso los secadores autónomos de varios modelos, provistos de sus respectivos quemadores. Y puede que el consumo de combustibles compense la no instalación de los grandes exhaustores que debieran aspirar los gases calientes de los hornos.

### 5.3. Alimentación

Los sistemas de alimentadores más recomendables son aquellos que permiten el paso de partículas gruesas sin dificultad. Los alimentadores de plato, de cinta o de láminas suelen dar buen resultado. Sin embargo, las instalaciones por circuito cerrado no consienten con la entrada de aire falso y exigen la interposición de esclusas celulares, propicias siempre al agarrotamiento cuando dan paso a materiales duros y gruesos o a materiales plásticos susceptibles de compactarse.

Las tolvas deben ser de fácil acceso, para limpieza o derribo de bóvedas, deben cargarse con simplicidad con los materiales procedentes de los trituradores, por descarga directa, o indirecta por medio de un puente-grúa.

### 5.4. Descarga

El mejor sistema es la descarga natural, por gravedad, sin intervención de elevadores o de cintas transportadoras, pero es tan sólo posible cuando el sistema de secado se puede montar a una cierta altura sobre el almacén que recibe los materiales secos.

La temperatura de descarga de dichos materiales hace que pocas veces sean recomendables las cintas transportadoras de goma, siendo preferidos los transportadores de cadena.

### **5.5. Despolvoreamiento**

El polvo que escapa con los gases procedentes del secado puede alcanzar cantidades de 30 a 100 g/m<sup>3</sup>. La captación de dicho polvo es una necesidad indiscutible. Se ha demostrado que las cámaras de humos, más o menos laberínticas, que preceden a las chimeneas en los casos de tiro natural, son de muy escaso rendimiento en lo que a la captación de polvo se refiere.

En general, los secadores de tiro forzado confían el despolvoreamiento al montaje de uno o varios ciclones. Aún así, los gases suelen contener un alto porcentaje de finos no captados por los ciclones. Pero si se tiene en cuenta el escaso valor económico de estos finos, raramente se puede afirmar que compense, por ejemplo, la instalación de un electrofiltro, a no ser que lo impongan razones de buena vecindad.

De ahí la ventaja de las instalaciones combinadas de molienda y secado, en circuito cerrado y con recirculación de gases. Claro está que la recirculación no puede ser total, porque la aportación de nuevas cantidades de gases calientes obliga a despejar su equivalente en gases enfriados. El exceso de gases se conduce a un nuevo despolvoreador, que puede ser otro ciclón o—si la temperatura es ya suficientemente baja—un filtro de mangas corriente.

En resumen, el problema del secado es bastante complejo para sentirnos interesados por él, a pesar de que, frecuentemente, haya sido relegado a un plano de menor importancia, empujado, sin duda, por sus hermanos mayores, hornos y molinos, tan impertinentes y fastidiosos, que mantienen en constante atención y desvelo a los sufridos técnicos de las fábricas de cemento.